

УДК 537.622; 537.611.3

ДОМЕННАЯ СТРУКТУРА ФЕРРОМАГНИТНЫХ СПЛАВОВ ГЕЙСЛЕРА Co-Ni-Ga

Л.Е. Афанасьева¹, С.Е. Ильяшенко², О.М. Корпусов², С.А. Чигиринский²,
Д.С. Юленков²

¹Тверской государственной технической университет,
кафедра технологии металлов и материаловедения

²Тверской государственной университет,
кафедра прикладной физики

Методами оптической микроскопии выявлена и изучена мартенситная и магнитная доменная структура поли- и монокристаллических образцов ферромагнитных сплавов Гейслера $\text{Co}_{2+x}\text{Ni}_{1-x}\text{Ga}$ ($x = 0,06 \dots 0,15$). Основные закономерности формирования и взаимодействия 90-градусных мартенситных и 180-градусных магнитных доменов в этих соединениях подобны установленным ранее на сплавах системы $\text{Ni}_{2+x}\text{Mn}_{1-x}\text{Ga}$.

Введение. Ферромагнитные сплавы Гейслера обладают редким сочетанием ферромагнетизма и структурных фазовых превращений из кубической высокотемпературной фазы (аустенит) в тетрагональную низкотемпературную фазу (мартенсит) [1]. Эта важная особенность открывает возможности управления формой и размерами образцов с помощью внешнего магнитного поля, что имеет большое практическое значение. В этой связи в последние годы проводятся интенсивные исследования сплавов $\text{Ni}_{2+x}\text{Mn}_{1-x}\text{Ga}$, для которых были достигнуты рекордно высокие (до 10%) значения магнитоуправляемой деформации [2]. Существуют также и другие перспективные, но менее изученные группы сплавов Гейслера, в частности, соединения на основе Co-Ni-Ga [3–5].

Целью данной работы явилось экспериментальное исследование мартенситной и магнитной доменных структур (ДС) в сплавах $\text{Co}_{2+x}\text{Ni}_{1-x}\text{Ga}$. Изучение закономерностей формирования и взаимодействия мартенситных и магнитных ДС играет важную роль для выяснения механизма магнитоуправляемой деформации ферроиков и практического применения этого эффекта в различных технических устройствах.

Методика эксперимента. Образцы сплавов $\text{Co}_{2+x}\text{Ni}_{1-x}\text{Ga}$ со значениями x от 0,12 до 0,19 были получены методом дуговой плавки. После выплавки проводился гомогенизирующий отжиг при 800°C в течение 100 часов с последующей закалкой в воду. Монокристаллы этих соединений выращивались методом Бриджмена в печи сопротивления в корундовых тиглях из слитков, полученных трёхкратной дуговой переплавкой. Исходная загрузка нагревалась и выдерживалась в вакууме порядка 10^{-4} мм рт. ст. при 1200°C . Затем камера заполнялась аргоном особой чистоты, температура поднималась до 1350°C и образовавшийся расплав выдерживался при этой температуре в течение часа. Последующее вытягивание тигля с расплавом проводилось со скоростью 20 мм в час.

Температуры мартенситных и магнитных переходов определялись методом терромагнитного анализа (ТМА) по температурной зависимости начальной магнитной восприимчивости. Наблюдения микроструктуры и магнитных доменов проводились поляризационно-оптическим методом на модифицированном металлографическом микроскопе МИМ-8 с цифровой регистрацией и обработкой изображений. Использовались взаимно дополняющие друг друга методики выявления ДС с помощью эффектов Керра, техники порошковых осадков и магнитных индикаторных плёнок [6].

Терромагнитный анализ. На рис. 1 представлена температурная зависимость начальной магнитной восприимчивости поликристаллических образцов сплавов $\text{Co}_{2+x}\text{Ni}_{1-x}\text{Ga}$ со значениями $x = 0,06, 0,09, 0,12$ и $0,15$.

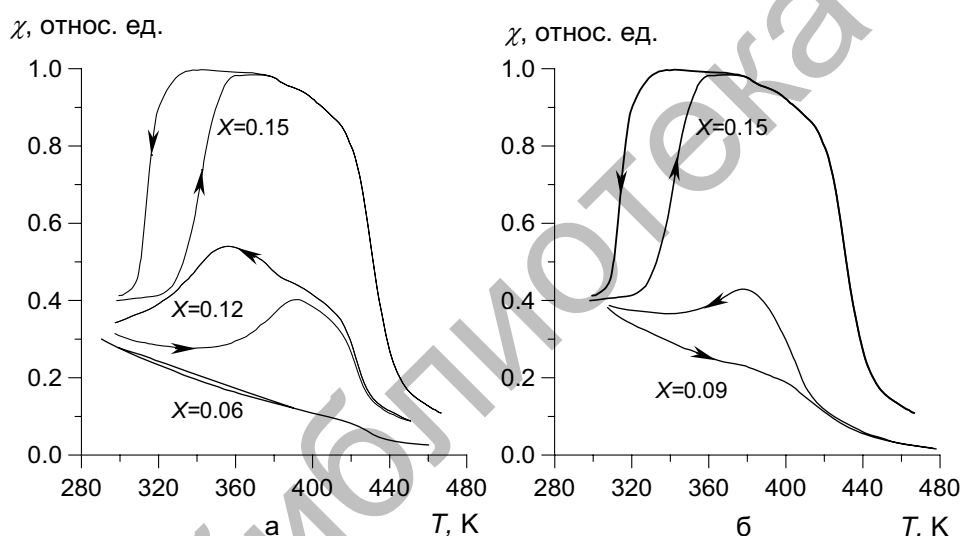


Рис. Температурная зависимость начальной магнитной восприимчивости χ для образцов $\text{Co}_2\text{Ni}_{1-x}\text{Ga}_{1+x}$ в ходе цикла нагрев – охлаждение

Из графиков видно, что увеличение замещение никеля галлием по сравнению со стехиометрическим составом Co_2NiGa слабо влияет на температуру окончательного превращения аустенита в мартенсит (M_f) и температуру Кюри (T_c). С другой стороны, это замещение приводит к уменьшению температур начала образования мартенситной фазы при охлаждении образца (M_s) и увеличению температур начала и конца образования аустенитной фазы (A_s и A_f). Процесс превращения мартенсит–аустенит–мартенсит по кривой ТМА для состава с $x = 0,06$ не обнаруживается, т.к. прямые и обратные структурные фазовые переходы происходят при температурах выше T_c (рис. 1, а). Для образца с $x = 0,09$ M_f меньше T_c , а A_s больше T_c , поэтому присутствие в образце аустенитной фазы выявляется только при охлаждении из парамагнитного состояния (рис. 1, б).

Мартенситная структура. Как отмечалось ранее [6], металлографические шлифы сплавов со структурным фазовым переходом обладают рядом особенностей. Плоские полированные поверхности, подготовленные на образцах, находящихся в аустенитном состоянии (при температурах выше температуры мартенситно-аустенитного превращения) становятся рельефными после перехода в низкотемпературную фазу. Благодаря этому создаётся оптический контраст между соседними мартенситными доменами, что позволяет изучать их структуру при обычных светопольных наблюдениях. На рис. 2 представлен полученный таким образом рельеф мартенситной структуры на различных кристаллографических поверхностях ориентированного монокристалла $\text{Co}_{48}\text{Ni}_{22}\text{Ga}_{30}$.

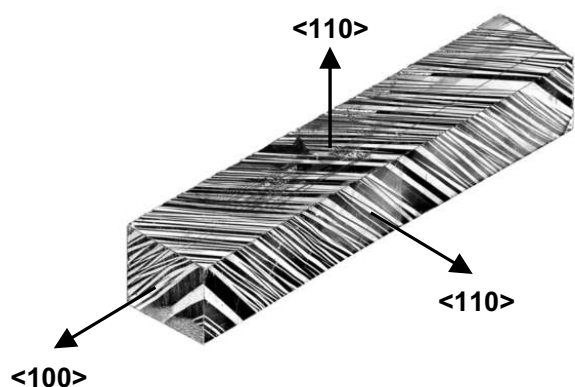


Рис. 2. Мартенситный рельеф ориентированного монокристалла $\text{Co}_{48}\text{Ni}_{22}\text{Ga}_{30}$ с размерами $3 \times 3 \times 15$ мм

Как видно из представленных данных, мартенситные пластины проходят через весь монокристаллический образец. Это свидетельствует о высоком качестве монокристалла и позволяет путём простых кристаллогеометрических измерений установить, что так же, как и в соединениях Ni_2MnGa , плоскости двойникования совпадают с кристаллографическими плоскостями типа (110). В поликристаллических образцах более сложное распределение внутренних напряжений приводит к образованию пересечений двойниковых систем разной ориентации (рис. 3).

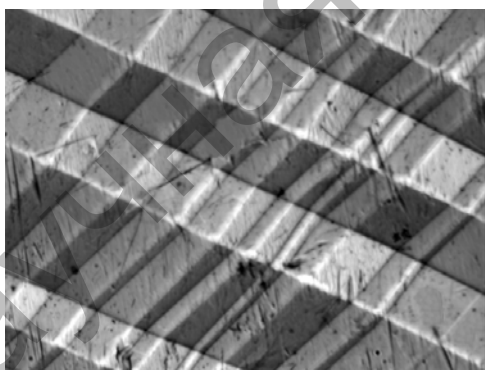


Рис. 3. Пересечение двух поидвойниковых систем разной ориентации в поликристаллическом образце $\text{Co}_2\text{Ni}_{0,85}\text{Ga}_{1,15}$

Магнитная доменная структура. На рис. 4 показан мартенситный рельеф на плоскости (110) монокристалла $\text{Co}_{48}\text{Ni}_{22}\text{Ga}_{30}$ и его связь с магнитной доменной структурой, выявленной с помощью полупрозрачной магнитооптической индикаторной феррит-гранатовый плёнки [6]. Подобно соединениям Ni-Mn-Ga, в изучаемых сплавах Co-Ni-Ga каждая мартенситная пластина разделена на магнитные домены 180-градусной ориентации, а двойниковые границы одновременно являются 90-градусными магнитными доменными границами типа Блоха.

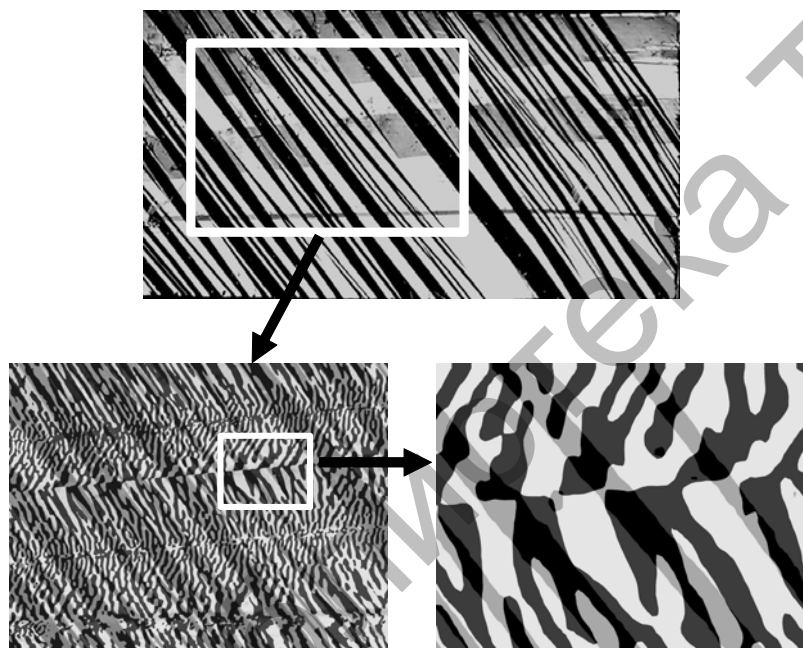


Рис. 4. Мартенситный рельеф на плоскости (110) монокристалла $\text{Co}_{48}\text{Ni}_{22}\text{Ga}_{30}$ (вверху) и его связь с магнитной доменной структурой (нижние кадры)

При наложении полупрозрачной плоскопараллельной индикаторной пластинки на поверхность образца с мартенситным рельефом возможно одновременное наблюдение магнитной доменной структуры и интерференционных полос, обусловленных мартенситным рельефом (рис. 5).

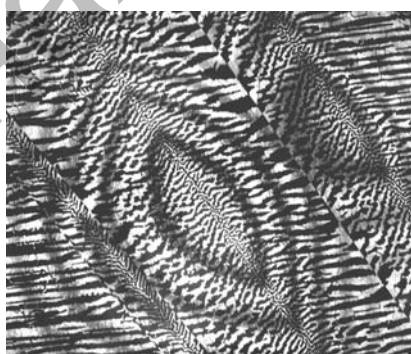


Рис. 5. Интерференционные полосы, обусловленные мартенситным рельефом и наблюдаемые при наложении плоскопараллельной индикаторной пластинки на поверхность образца [7]

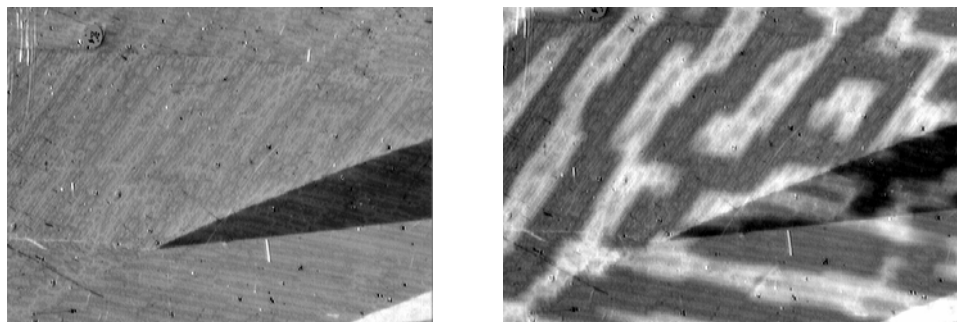


Рис. 6. Мартенситная и магнитная доменная структура поликристалла $\text{Co}_2\text{Ni}_{0,85}\text{Ga}_{1,15}$

В поликристаллических образцах поверхностные конфигурации магнитных доменов зависят от кристаллографической ориентации мартенситных пластин (рис. 6).

Выводы. Основные закономерности формирования и взаимодействия 90-градусных мартенситных и 180-градусных магнитных доменов ферромагнитных сплавов Гейслера $\text{Co}_{2+x}\text{Ni}_{1-x}\text{Ga}$ подобны установленным ранее для системы $\text{Ni}_{2+x}\text{Mn}_{1-x}\text{Ga}$. Следует ожидать сходства и других свойств этих семейств сплавов, в том числе определяющих их практическое использование.

Работа выполнена по тематике проекта "Фундаментальное и теоретическое исследование нелинейных свойств полупроводниковых, магнито- и сегнетоэлектрических материалов для микро- и нанoeлектроники", поддержанного Федеральным агентством по образованию.

Список литературы

1. Васильев А.Н., Бучельников В.Д., Такаги Т., Ховайло В.В., Эстрин Э.И. Ферромагнетики с памятью формы //УФН. 2003. Т. 173. С. 577–606.
2. Marioni M.A., O'Handley R.C., Allen S.M., Hall S.R., Paul D.I., Richard M.L., Feuchtwanger J., Peterson B.W., Chambers J.M., Techapiesancharoenkij R. The ferromagnetic shape-memory effect in Ni–Mn–Ga //J. Magn. Magn. Mater. 2005. V. 290–291. P. 35–41.
3. Wuttig M., Li J., Craciunescu C. A new ferromagnetic shape memory alloy system //Scr. Mater. 2001. V. 44. P. 2393–2397.
4. Craciunescu C.M., Wuttig M. New ferromagnetic and functionally graded shape memory alloys //J. Optoelectr. Adv. Mater. 2003. V. 5. P. 139–146.
5. Craciunescu C., Kishi Y., Lograsso T.A., Wuttig M. Martensitic transformation in Co_2NiGa ferromagnetic shape memory alloys //Scr. Mater. 2002. V. 47. P. 285–288.
6. Корпусов О.М., Смирнов Ю.М., Коледов В.В., Залётов А.Б., Чигиринский С.А., Юленков Д.С. Мартенситная и магнитная доменная структура ферромагнитных сплавов Гейслера //Вестник ТвГУ. Сер. "Физика". 2004. № 4(6). С. 81–87.
7. Нагибина И.М., Москалёв В.А., Полушкина Н.А., Рудин В.Л. Прикладная физическая оптика. М.: Высшая школа, 2002.